

桩基工程超声波透射检测技术现场应用与试验总结

惠林超 郭 威

河南省水利第一工程局集团有限公司 河南 郑州 450000

摘 要: 超声波透射检测技术作为桩基完整性评定的重要方法,在混凝土灌注桩质量管控中具有不可替代的作用。本文结合某工程桩基检测实践,系统阐述了超声波透射法的基本原理、现场操作流程。通过预设缺陷桩的对比试验,验证了声参量组合判别法的有效性,并针对管斜、声耦合不良等常见问题提出了改进措施。研究表明,综合运用声时修正、PSD判据及三维层析成像可显著提升检测分辨率,对Ⅱ类、Ⅲ类桩的检出率可达92%以上。本文还总结了检测时限、测管布置及环境温度影响等工程实用经验,旨在为类似工程提供技术参考。

关键词: 桩基工程;超声波透射检测;声波参数;完整性评价;现场试验

引言

随着我国基础设施建设的持续推进,大直径、超长混凝土灌注桩在桥梁、高层建筑及港口工程中广泛应用。由于地下施工隐蔽性强、混凝土浇筑质量受多种因素制约,桩身易出现缩径、离析、夹泥及空洞等缺陷,直接影响结构安全。因此,发展高效、准确的桩基无损检测技术具有重要的工程意义。目前常用的桩基完整性检测方法包括低应变反射波法、高应变动测法、钻芯法和超声波透射法。其中,超声波透射检测(Cross-hole Sonic Logging, CSL)凭借其信息丰富、分辨率高、不受桩长限制且可直观反映桩身断面混凝土均匀性等优势,已成为大直径灌注桩质量评定的首选方法之一。自20世纪80年代引入我国以来,CSL技术在规程完善、仪器迭代和判据优化方面取得了长足进步,《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106-2014)及《公路工程基桩检测技术规程》(JTG/T3512-2020)均对其作了详细规定。然而,现场检测中仍存在测管倾斜、声耦合不良、缺陷定量精度不足等突出问题,检测人员对异常数据的合理解读能力参差不齐。

1 超声波透射检测技术原理与方法

1.1 基本物理原理

超声波透射检测基于弹性波在混凝土介质中的传播特性。当超声脉冲从发射换能器发出,经耦合水介质进入桩身混凝土,沿桩身传播后被接收换能器拾取。混凝土的声学参数(声速、波幅、主频等)与其密度、弹性模量及内部缺陷密切相关。对于完整均匀混凝土,声速通常介于3800~4500m/s,波幅相对稳定;当遇到蜂窝、离析或夹泥等缺陷时,声速明显下降,波幅急剧衰减,

接收波形发生畸变^[1]。其理论基础为波动方程:

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

式中, v 为纵波声速, E 为弹性模量, μ 为泊松比, ρ 为密度。缺陷导致 ρ 和 E 改变,从而引起声速变化。

1.2 检测系统与测管布置

现场检测系统由超声检测仪、发射/接收换能器、深度编码器及专用电缆组成。本工程采用RSM-SY7型多通道超声仪,换能器谐振频率为50kHz,采样间隔0.1 μ s,发射电压1000V。声测管采用内径50mm、壁厚3.5mm的镀锌钢管,焊接于钢筋笼内侧,呈等边三角形或四边形布置,管底封闭、管顶加盖,管内注满清水作为耦合介质。测管布置遵循“对称、均匀、便于测量”原则。对于直径 ≤ 1.5 m的桩,布设3根管;直径1.5~2.5m布设4根;更大直径酌情增加。测管与钢筋笼牢固固定,确保平行度偏差不大于1/200。本工程桩径1.8m,采用四管布置,形成6个检测剖面。

1.3 检测流程与数据采集

现场测试按以下步骤进行:(1)检测前检查仪器状态,校准零声时;(2)向测管内注入洁净清水,静置30min以排除气泡;(3)将发射和接收换能器分别置于同一剖面两测管底部,同步提升,测点间距不大于250mm,提升速度不超过0.5m/s;(4)每个测点自动记录声时、波幅和波形,深度编码器同步记录位置;(5)逐剖面完成全桩长扫描,数据存入仪器^[2]。采集参数设置:采样长度1024点,发射脉宽20 μ s,增益自动调节使首波幅度达满屏的60%~80%。每剖面测试完成后,重复提升一次以检验重复性。遇可疑数据,加密测点或采用平测与斜测结合方式复测。

2 现场试验方案设计

2.1 工程概况与试验桩设置

某工程主墩桩基设计为钻孔灌注桩, 桩径 1.8m, 桩长 65m, 混凝土强度等级 C35, 水下浇筑。为验证超声波透射检测的识别能力, 在施工场地旁预制 3 根试验桩 (编号 SY-1 ~ SY-3), 尺寸与工程桩一致, 但在预设位置人为制造不同类型缺陷:

SY-1: 在桩深 25 ~ 27m 处设置模拟缩径, 通过内置环形气囊在混凝土初凝前充气形成局部断面缩减 (缩径率约 25%);

SY-2: 在桩深 40 ~ 42m 处预埋泡沫板, 模拟夹泥或空洞缺陷 (厚度约 8cm);

SY-3: 在桩深 15 ~ 16m 及 50 ~ 52m 处分别设置低强度混凝土区 (掺入膨润土使强度降低约 40%), 模拟离析。

所有试验桩同步浇筑, 养护 28d 后进行超声波检测, 并在检测后采用钻芯法验证, 以建立 “声学响应—实际缺陷” 对应关系。

2.2 检测参数与对比方案

每根试验桩均按四管六剖面进行全扫描, 测点间距 200mm。为对比不同分析方法的有效性, 设定三种判读方案:

方案 A: 仅依据声速临界值判别;

方案 B: 声速 + 波幅组合判别;

方案 C: 声速 + 波幅 + PSD 综合判别。

同时, 选取 3 根完整工程桩 (正常桩) 作为对照组, 统计其声速均值、标准差及波幅基准值, 作为评判基准。

2.3 环境条件与质量控制

检测期间环境温度 28 ~ 33°C, 水温 25 ~ 28°C, 测管内水头高度保持稳定。每根桩测试前进行零声时校准, 采用标准有机玻璃试块 (声时已知) 验证仪器一致性。所有测试数据由两名持证检测人员独立采集, 互校数据重复性误差控制在 2% 以内。

3 试验结果与分析

3.1 完整桩基准参数统计

对 3 根完整工程桩共 18 个检测剖面 (每桩 6 剖面) 的声学数据进行统计分析, 得到混凝土平均声速 4120m/s, 标准差 85m/s, 波幅基准值 102.5dB (增益统一), 正常声时范围 305 ~ 325 μ s (测管间距 1.2m)。声速频数分布呈正态特征, 95% 置信区间为 [3950, 4290]m/s, 据此将声速下限 3950m/s 作为完整混凝土最低阈值。

3.2 缺陷桩声参量响应特征

SY-1 缩径桩: 在 24.8 ~ 27.2m 深度范围, 各剖面声速由 4120m/s 骤降至 3480 ~ 3650m/s, 波幅下降 8 ~ 12dB, PSD 曲线在 25.0m 和 26.8m 处出现双峰突跳。斜测剖面 (发射与接收换能器不同深度) 显示异常区呈 “V” 形展布, 与缩径形态吻合。按方案 C 综合判别, 该段评定为 III 类缺陷, 钻芯验证芯样在该处直径缩减约 22%, 蜂窝状明显。

SY-2 夹泥桩: 在 39.6 ~ 42.3m 段, 声速降至 3100 ~ 3350m/s, 波幅下降达 15dB 以上, 接收波形明显畸变, 首波相位翻转。PSD 曲线在此段呈现宽幅高值平台, 而非尖峰, 反映出分散性夹泥特征。三个方案均能识别此缺陷, 但方案 A 仅判定为 “异常”, 方案 B 判定为 “严重衰减”, 方案 C 结合波形畸变确定为 “夹泥型缺陷”, 钻芯验证为黄褐色泥质夹层, 厚度约 7 ~ 9cm。

SY-3 离析桩: 浅部缺陷 (15 ~ 16m) 声速为 3750 ~ 3880m/s, 略低于正常值, 波幅下降 3 ~ 5dB, PSD 有轻微突起, 方案 A 漏判 (因未低于 0.9 倍均值, 即 3708m/s), 方案 B 判定为 “可疑”, 方案 C 结合频谱主频由 52kHz 下移至 46kHz, 判定为 “轻度离析”。深部缺陷 (50 ~ 52m) 声速为 3400 ~ 3550m/s, 波幅下降 7 ~ 9dB, PSD 明显突起, 三类方案均能识别, 但方案 C 准确定性为 “离析区”。钻芯验证浅部芯样粗骨料集中、砂浆较少, 深部芯样强度试验值较设计低 38%, 证实了综合判别的优势。

3.3 不同判别方案效果对比

将三种方案的判别结果与钻芯验证进行逐一比对, 统计如下 (以测点异常检出率计):

方案 A: 对缩径和夹泥缺陷检出率分别为 78% 和 85%, 但对离析缺陷的浅部漏检率达 60%, 总体准确率 76.3%;

方案 B: 对三类缺陷检出率分别为 86%、92% 和 74%, 总体准确率 84.0%, 波幅对含泥缺陷敏感但对轻度离析不足;

方案 C: 检出率分别达 94%、96% 和 88%, 总体准确率 92.7%, 且能较好区分缺陷类型。

结果表明, 多参数综合判别显著优于单一参数法, 尤其在缺陷定性方面, PSD 曲线形态和频谱特征提供了重要补充信息。

3.4 测管倾斜影响与修正方法

现场检测中,部分剖面(尤其是边管)发现声时随深度呈线性漂移,经测管倾斜度测量(采用倾斜仪),发现倾斜率约 0.6%~0.8%。按直线修正法对声时进行倾角校正: $t_{\text{corr}}=t_{\text{meas}}-\Delta t(z)$, 其中 $\Delta t(z)=\frac{2d(z)}{v_w}$, $d(z)$ 为测管间距变化值, v_w 为水中声速(取 1480m/s)。修正后,异常区声速值上调约 3%~5%,缺陷边界更清晰。未修正时,某完整段声速偏高达 4350m/s,修正后降至 4180m/s,更接近实际。建议实测中采用双向同步提升法,即发射和接收换能器同时提升并交换起始端,取平均可抵消部分管斜影响。

3.5 温度影响与时间效应试验

选取一根完整桩,在不同养护龄期(7d、14d、28d、60d)进行重复检测。结果显示,7d 龄期声速均值仅 3860m/s,28d 升至 4120m/s,60d 趋于 4180m/s,后期增幅趋缓。波幅随龄期增加约 2~3dB。说明混凝土硬化过程显著影响声速,故检测应在设计龄期(一般 28d)后进行,且基准值应与同龄期试块标定对比。本工程因工期要求,部分桩在 14d 预检,后于 28d 复检,两次结果差值用于修正初检判据。

4 工程应用关键技术问题讨论

4.1 声测管埋设与耦合质量控制

声测管接头应光滑、无焊瘤,底部封闭严密,防止水泥浆渗入。本工程曾有一根管因接头错台导致换能器卡滞,被迫更换测管。建议管壁内径不小于 40mm,接头采用螺纹连接而非焊接,以减少变形^[3]。管与管之间用定位支架固定,间距不超过 2m。注水水质要求清洁无杂质,pH 值中性,否则水中悬浮物会加剧声衰减。现场可用纯净水或静置沉淀后的自来水。

4.2 缺陷定量与三维成像尝试

传统 CSL 以剖面异常描述缺陷,难以直观反映空间展布。本试验借鉴医学 CT 原理,对 SY-2 桩的多个剖面异常点进行空间插值,构建缺陷体三维等值面图。采用反距离加权插值法,将各测点声速映射至桩体横截面网格,生成不同深度切片。结果显示,夹泥区域在横截面上呈不规则片状,投影面积约占断面的 18%,与钻芯揭露的分布基本一致。尽管该方法依赖较多剖面(至少 4 管),但为缺陷定量评估提供了新思路,后续可发展为层析成像(CT)实用模块。

4.3 现场干扰因素识别与排除

实践中常见干扰包括:(1)换能器提升速度不均匀,导致采样深度错位——解决:采用自动恒速绞车;(2)测管底部沉渣过厚,换能器无法下至设计深度——措施:清孔后及时灌注清水并反复提拉换能器洗管;(3)邻近施工振动干扰——选在静默时段检测;(4)电源电压波动——配备稳压器^[4]。本工程制定了《现场检测干扰排查清单》,逐项确认,有效保障了数据可靠性。

4.4 检测时限与复检策略

根据本工程经验,建议检测窗口期为混凝土终凝后 7~28d,以 28d 标准龄期为准。若需早期预判,可在 7d 进行初检,重点识别明显缺陷,待 28d 复检最终评定。对于判定为 III 类的桩,应扩大检测剖面(增加斜测、扇形扫测)并钻芯验证,严禁仅凭单剖面下结论。本工程共有 3 根桩初评为 III 类,经复检和钻芯,其中 1 根修正为 II 类,2 根确认 III 类并进行了注浆补强处理。

5 结语

本文结合某桥梁工程桩基检测实践,对超声波透射检测技术的现场应用进行了系统试验与总结。通过预设缺陷桩的对比研究,验证了多参数综合判据的优越性,提出了测管倾斜修正、龄期匹配和三维成像辅助判别等改进措施,形成了一套较为完整的现场操作与数据分析流程。实践表明,精细化的检测管理和科学的判读方法能够显著提高缺陷检出率和分类准确性。鉴于当前工程中对异常数据的合理解读仍存在一定主观性,后续研究可朝向智能化判据和自动识别算法方向发展,以进一步提升检测技术的标准化与可靠性。

参考文献

- [1] 张宏建,李志强,王磊.基桩超声波透射法检测中声速异常值判定方法研究[J].岩土力学,2022,43(8):2245-2253.
- [2] 陈伟,刘汉阳,周明.基于 PSD 判据的灌注桩超声检测缺陷识别优化[J].公路交通科技,2023,40(3):89-96.
- [3] 杨秀敏,赵金海,孙晓光.大直径灌注桩超声层析成像技术现场试验研究[J].桥梁建设,2024,54(1):112-119.
- [4] 吴建国,郑辉,林峰.测管倾斜对超声波透射检测精度的影响及修正方法[J].振动与冲击,2021,40(19):278-284.